

**Vladimíra MICHALCOVÁ<sup>1</sup>, Zdeněk MICHALEC<sup>2</sup>, Tomáš BLEJCHAŘ<sup>3</sup>**

**NUMERICKÁ SIMULACE VLIVU MEZNÍ VRSTVY ATMOSFÉRY NA ROZVOJ  
NÍZKOTEPLTNÍ OXIDACE VE SKLÁDCE UHLÍ**

**NUMERICAL SIMULATION OF INFLUENCE ATMOSPHERIC BOUNDARY LAYER ON THE  
LOW-OXIDATION PROGRESS IN THE COAL STOCKPILE**

**Abstrakt**

Článek popisuje proudění větru v mezní vrstvě atmosféry kolem skládky uhlí. Tato úloha představuje dílčí úsek projektu, který řeší rozvoj nízkoteplotní oxidace ve skládkách uhlí a odvalech. Pozornost je věnována také tvorbě povrchu v okolí skládky na základě GIS dat, a následnému zjednodušení geometrie nahrazením budov porézní oblastí. Simulace proudění zahrnuje 8 dominantních směrů větrné růžice definovaných střední rychlostí. Pomocí FFT (fourierova analýza) byla provedena analýza složek okamžité rychlosti a teploty. Spektrum rychlosti a teploty v intervalu 1 měsíce bylo použito k nestacionární simulaci proudění v okolí reálné skládky uhlí.

**Klíčová slova**

CFD, mezní vrstva atmosféry, skládka uhlí, odval

**1 ÚVOD**

Proudění v mezní vrstvě atmosféry je charakteristické časově proměnlivou rychlostí a směrem větru. Samovznícování uhelné hmoty v uhelných skládkách a odvalech je silně závislé na lokálních atmosférických podmínkách. Z hlediska problematiky proudění se jedná o poměrně složitou úlohu, neboť proudění v mezní vrstvě je plně turbulentní, ale proudění v haldě nebo odvalu je laminární. Samotné proudění v mezní vrstvě je časově náhodné a i v dnešní době není možné popsat detailně veškeré jevy, ke kterým při transportu hmoty a tepla v atmosféře dochází. Z tohoto důvodu je nutné při modelování provést celou řadu zjednodušení a některé jevy zanedbat. Problematika samovznícování uhlí je také poměrně komplikovaná a samotný proces ještě není zcela spolehlivě vysvětlen a popsán. Samovznícování uhelné hmoty je závislé na teplotě a rychlosti vzduchu, který proudí skrz haldu nebo skládku. Do tohoto procesu vstupuje také vzdušná vlhkost a mnoho dalších komplexních dějů. Jak je z předchozího textu zřejmé, je v této oblasti ještě celá řada nezodpovězených otázek. V této práci se snažíme navrhnout postup při řešení tohoto problému, protože i v dnešní době není možné tuto úlohu řešit komplexně z důvodu nedostatečného výkonu výpočetních prostředků.

---

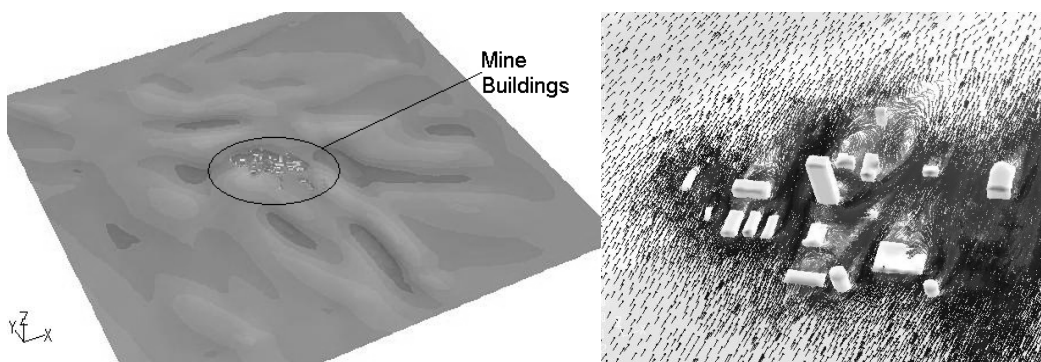
<sup>1</sup> Ing. Vladimíra Michalcová, Ph.D., VŠB - Technická univerzita Ostrava, Fakulta stavební (FAST), Katedra stavební mechaniky, Ludvíka Poděště 1875/17, 708 33 Ostrava - Poruba, tel.: (+420) 597 321 348, e-mail: vladimira.michalcova@vsb.cz.

<sup>2</sup> Ing. Zdeněk Michalec, Ústav geoniky AV ČR, Studentská 1768, Ostrava Poruba tel.: (+420) 596 747 017, e-mail: michalec@ugn.cas.cz.

<sup>3</sup> Ing. Tomáš Blejchař, Ph.D., VŠB - Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení, 17.listopadu 15, 708 33 Ostrava - Poruba, tel.: (+420) 597 325 753, e-mail: tomas.blejchar@vsb.cz.

## 2 TOPOLOGIE TERÉNU

Jako vzorový příklad, na kterém bude celý proces testován, byla zvolena uhelná skládka dolu Lazy v Orlové. Proudění v okolí haldy je ovlivněno jednak lokálními aerodynamickými poměry, ale hlavně tvarem terénu. Z tohoto důvodu byla pro simulace využita mapa v GIS formátu, jejíž součástí byly také všechny významné budovy. Rozměr mapy byl 4,3 x 4,3 km. Nebyla dodána jako celek, ale po částech, o velikosti cca 1,5 km x 1,5 km. Jednotlivé povrchy bylo nutné sloučit a upravit tak, aby na sebe vzájemně navazovaly. Tím byla vytvořena výpočtová oblast o rozměrech 4,3 x 4,3 km a výšky 400 m. Pro možnosti zadávání vertikálních profilů vstupních turbulentních veličin bylo nutné vytvořit na všech čtyřech stranách náběhové prostory zajišťující shodný vertikální vstupní prostor. Z důvodu zajištění rovnováhy výpočtu turbulentních veličin [1], [2], bylo nutné dodržet velikosti buněk u stěn i poměr velikosti sousedních buněk. Splnění těchto podmínek vedlo k jejich velkému počtu (1,5 mil). Problematické je kromě skutečného vlnitého terénu také počet a velikosti budov v blízkosti skládky. Z tohoto důvodu byly budovy nahrazeny porézní oblastí, která klade ekvivalentní odpor jako při proudění vzduchu okolo budov, respektive přes porézní oblast. Hodnoty odporových součinitelů porézní oblasti jsou v tabulce 1. Toto nahrazení bylo provedeno s ohledem na hardwarové nároky a rychlost výpočtu. Postup při nahrazení budov porézní oblastí byl relativně jednoduchý. Byl proveden výpočet pro čtyři rychlosti větru s reálnými budovami viz obr.1. Na povrchu ohraničující objem, který bude nahrazovat budovy, byla odečtena tlaková ztráta. Z těchto výpočtů byly následně stanoveny odporové koeficienty porézní oblasti. Tímto krokem klesl počet buněk na 523 tisíc.



Obr.1: Geometrie terénu s budovami (vlevo) a detail rychlostního pole v okolí budov (vpravo)

Tab.1: Výpočet odporových součinitelů

| Inlet velocity<br>(vstup) | Outlet velocity<br>(výstup) | Rychlost těsně před budovami | Statický tlak na hranicích oblasti budov<br>(přední a zadní) |      | Tlakový rozdíl $\Delta p$ | Tlaková ztráta | Ztrátový součinitel | Odporový součinitel |
|---------------------------|-----------------------------|------------------------------|--|------|---------------------------|----------------|---------------------|---------------------|
| m.s <sup>-1</sup>         |                             |                              | Pa   |      |                           | -              | m <sup>-1</sup>     |                     |
| 17.4                      | 22.7                        | 21.3                         | 378.2  | 72.8 | 305.4                     | 176.17         | 0.632               | <b>0.0021</b>       |
| 11.6                      | 15.1                        | 14.2                         | 167.2  | 32.3 | 134.9                     | 77.43          | 0.625               | <b>0.0021</b>       |
| 5.8                       | 7.6                         | 7.1                          | 42.2   | 7.8  | 34.4                      | 19.98          | 0.645               | <b>0.0022</b>       |
| 2.3                       | 3.0                         | 2.8                          | 6.9  | 1.4  | 5.6                       | 3.26           | 0.677               | <b>0.0023</b>       |

## 3 ANALÝZA POVĚTRNOSTNÍCH PODMÍNEK

Pro zjištění vlivu větru na samovznícování uhlé hmoty ve skládce je nutné analyzovat lokální aerodynamické poměry - jmenovitě rychlost i směr větru a teplotu. Tuto analýzu je možné

provést statistickými nástroji, pomocí kterých je možné zcela náhodný směr větru rozložit do osmi základních směrů. V každém z těchto osmi základních směrů orientovaných dle světových stran je určena průměrná rychlost a četnost výskytu. Tato statistická analýza se odborně nazývá větrná růžice. Je možné ji vytvořit pro libovolný časový úsek anebo ji získat z meteorologických ústavů. V našem případě jsme jako referenční měsíc zvolili červenec. Pro tento měsíc byl získán záznam rychlosti, směru větru a teploty v 15ti minutových intervalech. Z těchto dat pak byla následně stanovena větrná růžice. Základní meteorologická data udávají pouze rychlost a směr větru. Tyto podklady bylo nutné před analýzou upravit, protože v simulaci je rychlost řešena ve třech základních složkách v kartézském souřadném systému. Z tohoto důvodu tedy byla rychlost rozložena do směru x a y. Vytvořený měsíční grafický záznam obou směrů rychlosti i teploty jsou v obr.2. Složka ve směru z je nulová, protože vzestupný nebo sestupný směr větru se neměří a není ani běžně udáván. Analýzou dat za měsíc červenec byla vytvořena větrná růžice (tab.2). Tyto veličiny jsou již použitelné v numerické simulaci. Pomocí těchto simulací je možné získat jakýsi statistický průběh rychlostního pole a tlakového namáhání haldy pro osm referenčních případů.

Tab.2: Výsledky statistické analýzy velikosti a směru větru, větrná růžice

| Směr  | $v_{10} [\text{m.s}^{-1}]$ | směrový vektor |         |
|-------|----------------------------|----------------|---------|
|       |                            | $x$            | $y$     |
| S     | 1.87                       | 0              | -1      |
| SV    | 1.77                       | -0.7071        | -0.7071 |
| V     | 0.85                       | -1             | 0       |
| JV    | 1.24                       | -0.7071        | 0.7071  |
| J     | 2.28                       | 0              | 1       |
| JZ    | 3.54                       | 0.7071         | 0.7071  |
| Z     | 3.52                       | 1              | 0       |
| SZ    | 1.95                       | 0.7071         | -0.7071 |
| bezv. | 1.87                       | 0              | -1      |

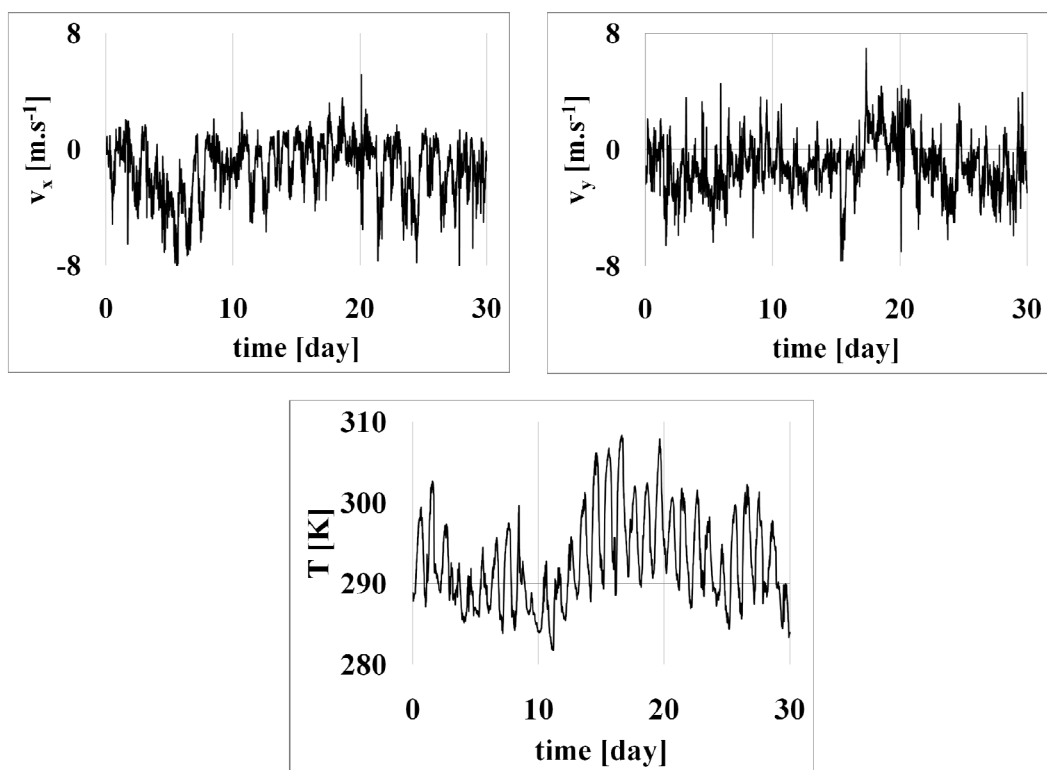
Rychlost a směr větru jsou určeny ve výšce 10 m. Pro definici rychlostního profilu v atmosféře byl zvolen mocninný profil. Tento profil je specifikován referenční rychlostí  $v_{10}$  [3] a mocninným koeficientem  $p$ , který je funkcí stavu atmosféry.

$$v = v_{10} \cdot \left( \frac{z}{10} \right)^p \quad (1)$$

kde:

- $v_{10}$  – je referenční rychlost určená z větrné růžice [ $\text{ms}^{-1}$ ],
- $z$  – výška měřená od zemského povrchu [m] a
- $p$  – mocninný koeficient [-].

Pro stabilní stav atmosféry je mocninný koeficient určen hodnotou  $p=0,22$ .

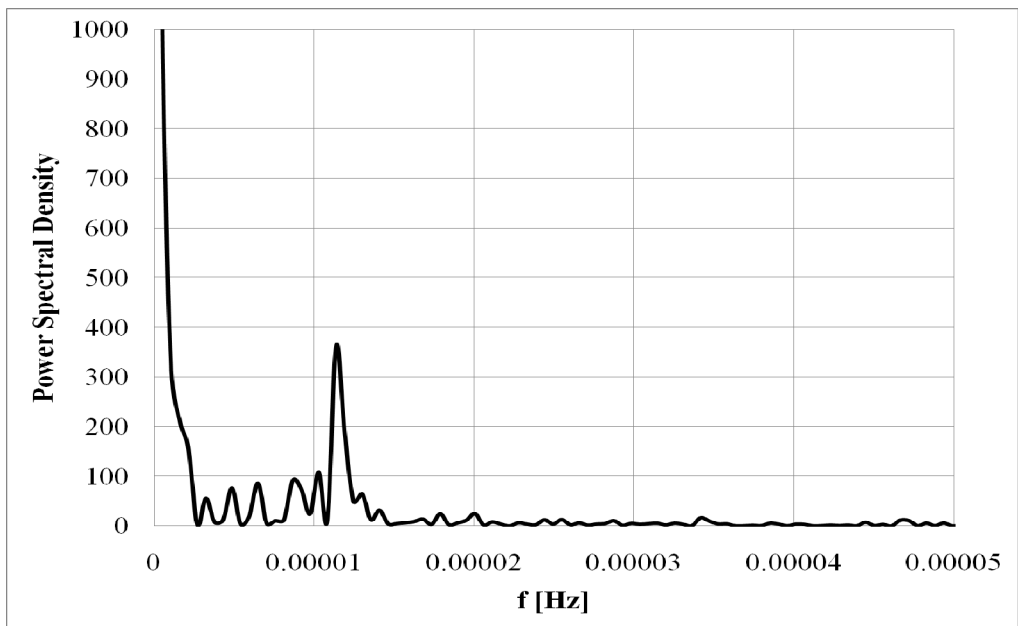


Obr.2: Skutečný časový záznam rychlosti přepočtený do směru  $x$  (vlevo),  $y$  (vpravo) a teploty vzduchu (dole) v simulovaném období (červenec 2009)

Tyto simulace ale poměrně silně zjednodušují komplexní chování atmosféry. Směr větru a jeho velikost se totiž v čase mění a samotný proces samovzněcování je závislý také na předchozích stavech atmosféry, jako např. střídání dne a noci, náhodné střídání směru a intenzity a pod. Z tohoto důvodu byla také provedena FFT analýza časového záznamu. Touto analýzou bylo získáno časové spektrum rychlosti a teploty, z kterého je pak možné určit amplitudy a frekvence nejčastěji vyskytujících se fluktuací rychlosti. Časově závislá náhodná rychlost je tímto poměrně přesně popsána funkcí, která je dána součtem dominantních sinusových signálů, o frekvenci a amplitudě, které jsou odečtené ze spektra. Teoreticky by bylo nutné signál popsat jako sumu nekonečně mnoha sinusových signálů, my jsme ale využili pouze osm nejvýraznějších maxim v časovém spektru viz (2), [4] a obr.3.

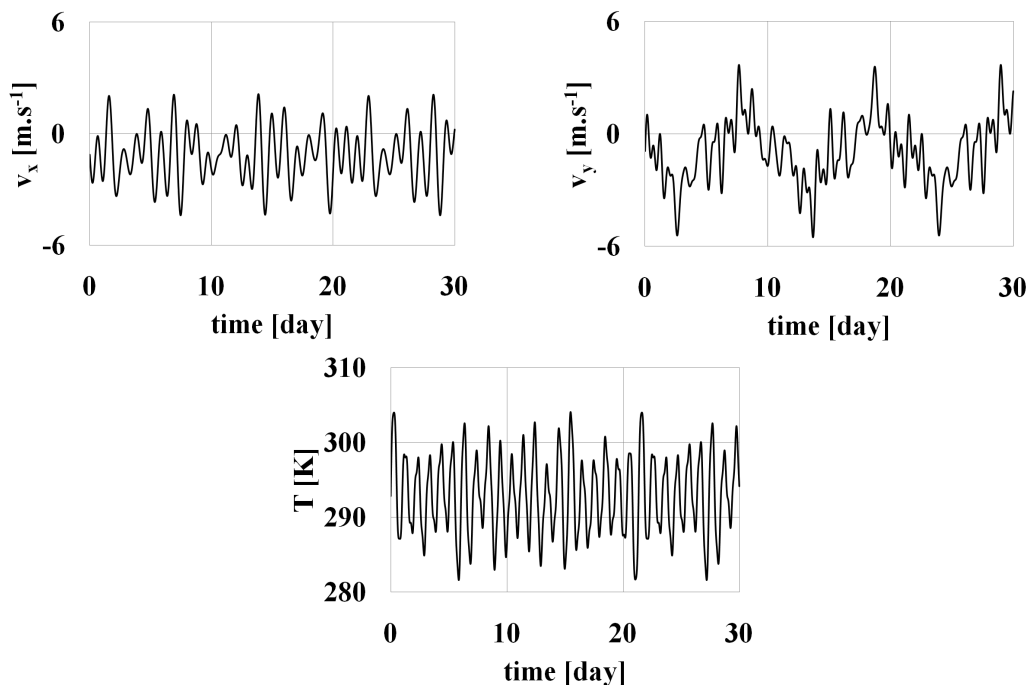
$$v = v_0 + \sum_{i=1}^8 a_i \sin(\omega_i \cdot t), \quad T = T_0 + \sum_{i=1}^8 a_i \sin(\omega_i \cdot t) \quad (2)$$

Všechna časová spektra totiž obsahovala maximálně osm výrazných maxim. Další již byly nevýrazné. Také index korelace již byl pro osm složek akceptovatelný. Pro přesnější analýzu by bylo nutné analyzovat delší časový úsek, ten ale nebyl k dispozici.



Obr.3: Příklad spektrální analýzy pro složku rychlosti  $v_x$

Touto analýzou byly nahrazeny složky rychlosti  $v_x$  a  $v_y$ , a také teplota vzduchu (obr.4). Využitím této definice rychlosti je možné řešit sice pouze jednu simulaci, ovšem časově závislou. Tato simulace již v sobě zahrnuje ve zjednodušené formě také historické procesy, které se odehrávaly v atmosféře.



Obr.4: Simulovaný časový záznam rychlosti přepočtený do směru  $x$  (vlevo),  $y$  (vpravo) a teploty vzduchu (dole) v CFD simulaci

## 4 POPIS ÚLOHY A OKRAJOVÉ PODMÍNKY

Problematika proudění větru v atmosféře byla řešena pro 2 typy úloh.

### 4.1 Stacionární úloha

První typ úlohy byl stacionární a byl řešen pro osm základních směrů větru, s tím, že každý směr byl řešen samostatně. Rychlost byla v tomto případě definována mocninným profilem (1). Hodnota referenční rychlosti pro dané směry větru byla stanovena z větrné růžice v tab.2. Teplota byla stanovena jako konstantní, a to průměrná za měsíc červenec  $t = 19.65\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Turbulentní parametry byly definovány na základě stavu atmosféry a třetí rychlosti  $v_*$ , která se určuje dle vztahu:

$$v_* = \frac{0.419 v_{10}}{\ln((10 + z_0)/z_0)} \quad (3)$$

Třetí rychlost závisí na terénu, rychlosti větru  $v_{10}$  a nastavení výpočtu [1]. Parametr  $z_0=0$ , odpovídá drsnosti okolního terénu v souvislosti s velikostí první buňky u stěny a nastavení drsnosti ve výpočtu [1].

Turbulentní kinetickou energii  $k$  je pak možné definovat vztahem, který udává konstantní hodnotu turbulence v mezní vrstvě atmosféry:

$$k = \frac{v_*^2}{0.3} \quad (4)$$

Rychlost disipace  $\varepsilon$  je definována vztahem, který je funkcí výšky  $z$ . Disipace tak není po výšce konstantní, ale mění se s rostoucí výškou:

$$\varepsilon = \frac{v_*^3}{0.419 \cdot z} \quad (5)$$

Hodnoty turbulentních veličin pro dané směry větru dle větrné růžice jsou uvedeny v tab.3. U stacionární úlohy, která řeší každý směr větru samostatně, byla na vstupu do oblasti zadaná okrajová podmínka „velocity inlet“ a na výstupu „pressure outlet“.

Tab.3: Hodnoty vstupních turbulentních veličin

| směr<br>větru | referenční rychlost<br>$v_{10}$<br>[m.s <sup>-1</sup> ] | třetí rychlost<br>[m.s <sup>-1</sup> ] | turbulentní kinetická<br>energie<br>[m <sup>2</sup> .s <sup>-2</sup> ] | rychlost disipace v<br>10ti metrech<br>[m <sup>2</sup> .s <sup>-3</sup> ] |
|---------------|---|--|--|---|
| S             | 1.87  | 0.170                                  | 0.096  | 0.00117   |
| SV            | 1.77  | 0.161                                  | 0.086  | 0.00099   |
| V             | 0.85  | 0.077                                  | 0.020  | 0.00011   |
| JV            | 1.24  | 0.112                                  | 0.042  | 0.00034   |
| J             | 2.28  | 0.207                                  | 0.143  | 0.00211   |
| JZ            | 3.54  | 0.321                                  | 0.344  | 0.00791   |
| Z             | 3.52  | 0.319                                  | 0.340  | 0.00778   |
| SZ            | 1.95  | 0.177                                  | 0.104  | 0.00132   |
| bezv.         | 0   | 0.000                                  | 0.000  | 0.00000   |

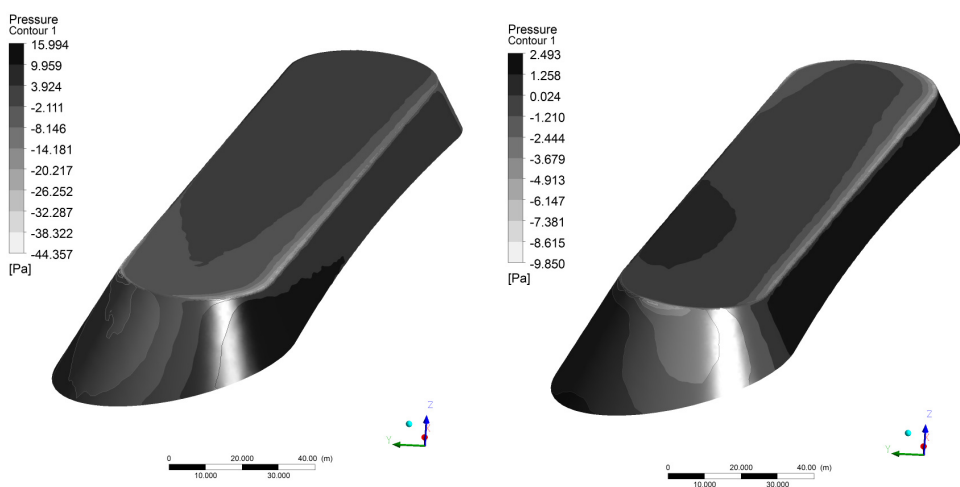
## 4.2. Nestacionární úloha

Druhý typ úlohy byl řešen jako nestacionární, tj. závislý na čase, tak, aby bylo možno do výpočtu zahrnout změnu rychlosti i jejího směru v průběhu dne. Okrajové podmínky pro turbulentní parametry byly definovány stejně jako u první úlohy. Změna byla pouze u rychlosti a teploty. Rychlost nebyla definována rychlostním profilem, ale jako konstantní po výšce s časově proměnnou hodnotou i směrem prostřednictvím složek rychlosti pro směr x a y (obr.4), které byly specifikovány pomocí sinusového signálu (2). Také teplota byla definována sinusovým signálem, který již respektoval její změnu v průběhu dne.

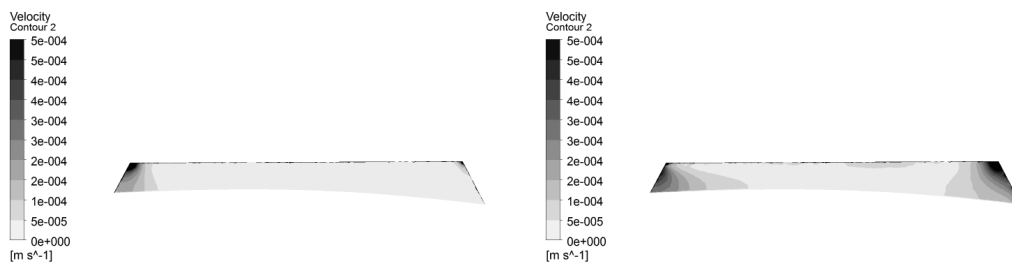
U nestacionární úlohy popisující cyklickou změnu větru bylo nutné zadat po celém obvodu výpočtové oblasti okrajovou podmínku „velocity inlet“. Pro zajištění stability a konvergence výpočtu je nutno pracovat s časovým krokem menším než 60 sekund.

## 5 VÝSLEDKY

Hlavním výsledkem simulace je rozložení statického tlaku na povrchu skládky uhlí a rychlost uvnitř skládky bez zdroje tepla (obr.5 a 6). Rozvoj nízkoteplotní oxidace uhlí lze předpokládat uvnitř skládky uhlí, kde se rychlost pohybuje v intervalu 0,1-1,0 m/min, je to tzv. kritická rychlost.



Obr.5: Rozložení statického tlaku na povrchu skládky uhlí při směru větru JZ (vlevo ) a J (vpravo)



Obr.6: Příčné řezy skládkou.

Rozložení rychlosti proudění uvnitř skládky uhlí při směru větru JZ (vlevo ) a J (vpravo)

## 6 ZÁVĚR

Výše popsaným způsobem výpočtu vycházejícího z větrné růžice byla definována a odzkoušena možnost numerické simulace proudění větru se zahrnutím vlivu reálného terénu i zjednodušených historických procesů odehrávajících se v atmosféře (změny směrů i velikosti rychlosti větru a změny teploty v průběhu dne).

Námi navržená metodika zahrnuje způsob aplikace okamžitých změn rychlosti i směru větru a kolísání teploty v průběhu měsíce pro potřeby numerické simulace působení pohybu atmosférické mezní vrstvy na rozvoj nízkoteplotní oxidace v uhelných skládkách a odvalech.

U obou typů úloh byla zajištěna stabilita výpočtu a jsou tímto připraveny podklady pro řešení další samostatné etapy komplexního úkolu.

Připravená metodika bude využita pro řešení vlivu atmosféry na chemické procesy v uhlénné skládce, jež je dalším dílčím úkolem celkového již zmiňovaného projektu [5]. Problematika samovznícování uhlí je komplikovaná, při řešení je kladen velký důraz na správnou tvorbu sítě modelu skládky. Pro splnění podmínek správného výpočtu to povede k obrovskému nárůstu počtu buněk a k nárokům jednak na hardwarové vybavení i doby výpočtů.

## PODĚKOVÁNÍ

Příspěvek byl realizován za finančního přispění Grantové agentury ČR, *projekt 105/08/1414*.

## LITERATURA

- [1] Fluent 12.1, Users Guide, Tutorial Guide, Ansys Inc.2010.
- [2] MICHALCOVÁ, V. Numerické modelování zatížení budov při kvazistatickém působení větru: Disertační práce Fakulta stavební, VŠB–TU Ostrava, Ostrava 2007. ISBN 978-80-248-1529-9
- [3] VESTEEG, H. K. & MALASEKERA, W *Introduction to Computational Fluid Dynamics*. Pearson Education Limited, England, 2007. ISBN 978-0-13-127498-3.
- [4] BROUGHTON, S. A. & BRYAN, K. *Discrete Fourier analysis and wavelets: applications to signal and image processing*, Hoboken : Wiley, 2009. 250 pp. ISBN 978-0-470-29466-6.
- [5] BOJKO, M. & KOZUBKOVÁ, M.: Methodic of the mathematical modelling of the low-temperature oxidation of coal (spontaneous of coal) defined in porous zone. *Mechanical Engineering journal – Strojírenství*. KET Sjf Košice, 2009, pp. 15-17, ISSN 1335-2938.

## Oponentní posudek vypracoval:

RNDr. Jan Chura, Ústav geoniky AV ČR, Ostrava Poruba